

ГИСТЕРЕЗИСНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2019 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь 220013 Минск, пр-т Независимости, 65

*E-mail: es_doroshevich@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2019; после доработки 13.08.2019

Принята к публикации 16.08.2019

Изложены расчеты зависимостей электрического напряжения $U(H)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель с остаточными магнитными полями, от напряженности магнитного поля. Восходящая и нисходящая ветви гистерезисных зависимостей $U(H)$ описаны функциями арктангенса. Представлены также распределения электрического напряжения $U(x)$ от расстояния x до проекции оси линейного источника импульсного магнитного поля на магнитный носитель. На основании полученных распределений сформированы оптические изображения остаточных магнитных полей. Распределения $U(x)$ получены для перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля с задержками друг относительно друга. Показано, что полученные результаты позволяют повысить чувствительность измерений и точность контроля толщины и параметров дефектов сплошности в электропроводящих объектах.

Ключевые слова: гистерезисная интерференция, магнитный носитель, прямые и обратные ветви гистерезиса остаточных магнитных полей, арктангенс.

DOI: 10.1134/S0130308219120078

ВВЕДЕНИЕ

Явление гистерезисной интерференции (HI) присутствует во всех системах измерения и контроля. Реализация HI в разных методах контроля может повысить точность и чувствительность измерений в разы и даже на порядки.

Проведен краткий анализ электромагнитных и близких к ним методов контроля на предмет использования в них гистерезисной интерференции. При этом определяют толщину объектов, удельную электропроводность и магнитную проницаемость их материала, параметры дефектов сплошности и структурных неоднородностей, а также другие параметры объектов.

При использовании магнитного и магнитографического методов [1—4] гистерезисная интерференция определяется гистерезисными свойствами материала объекта, магнитного носителя, считывающего устройства и источника магнитного поля.

Магнитоимпульсный, вихретоковый и индукционный методы [5—8] могут быть дополнены HI , которая определяется гистерезисными свойствами материала объекта и источника поля, приемных катушек, измерительных и электропитающих проводов, устройств считывания и свойствами сердечников преобразователей магнитных полей.

В случае применения магнитодинамического метода [9] следует разработать методы гистерезисной интерференции с учетом перемещения постоянного магнита или электромагнита, а также гистерезиса измерения изменяющегося магнитного потока.

При разработке электрических емкостных методов контроля [10] целесообразно учитывать гистерезис емкостных датчиков и задержек, связанных со временем установления стационарных электрических состояний материала объекта. Точность определения параметров дефектов в ферромагнитной пластине [11] с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, могла быть выше, если бы учитывали гистерезисные свойства этой пленки.

Таким образом, показаны возможные пути развития методов гистерезисной интерференции для перечисленных методов контроля. Это развитие заключается в использовании гистерезисной интерференции полей дефектов источников поля, преобразователей магнитного поля, исследуемых материалов и объектов, считывающих устройств, подводящих проводников в системе измерения.

В разработках авторов [12—16] получена гистерезисная интерференция в импульсных магнитных полях на магнитном носителе, магнитооптической пленке и пленочных флюкс-детекторах. Эти работы позволяют развивать теорию гистерезисной интерференции и совершенствовать экспериментальные исследования HI .

Является актуальным вопрос получения гистерезисной интерференции с помощью импульсных магнитных полей двух и более источников, создающих импульсы сложной формы и действующих одновременно или с различными задержками во времени.

Целью настоящей работы является повышение чувствительности измерения и точности контроля толщины электропроводящих материалов и параметров дефектов сплошности в них в импульсных магнитных полях с использованием гистерезисной интерференции на магнитном носителе путем расчета сигналов датчиков магнитного поля и расчета интерференционных картин, созданных перекрывающимися во времени импульсами магнитного поля.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для воздействия на электропроводящие объекты формируют одиночные импульсы магнитного поля с разными параметрами переднего и заднего фронтов и с различным количеством выбросов поля. В частности, при использовании одной из сторон контура следует учитывать гистерезис, обусловленный полями, создаваемыми тремя другими сторонами контура.

При двух воздействующих импульсах поля картина HI определяется максимальной напряженностью магнитного поля в прямом направлении и максимальной напряженностью магнитного поля последующего импульса в обратном направлении.

В настоящей работе зависимость электрического напряжения $U(H)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель (МН) с остаточными магнитными полями, от напряженности магнитного поля представлена авторами как функция арктангенса. Эта зависимость является более точной, чем зависимость в виде отрезков прямых линий [14]. Она не содержит ломаных участков сочленения и работает в одном интервале значений аргумента. Все это позволяет повысить точность измерения и возможности программного обеспечения измерений.

Арктангенсная зависимость использована нами также в [15]. Однако это была зависимость со смещающимися в процессе перемагничивания параметрами ветвей гистерезиса магнитного носителя. В представляемой работе использованы магнитные носители с неизменными симметричными характеристиками в прямом и обратном направлении импульсного магнитного поля. При этом отличной была начальная кривая намагничивания, полученная из размагниченного состояния магнитного носителя.

В работе использован линейный индуктор. Расчеты гистерезисной интерференции линейного индуктора могут быть применены также для расчета гистерезисной интерференции полей дефектов сплошности, структурных неоднородностей и так далее.

Начальная кривая остаточного намагничивания (остаточных магнитных полей МН), представленная в виде зависимости величины электрического напряжения $U_1(H)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель с записанной на нем информацией, от напряженности H приложенного к нему магнитного поля, описана следующей функцией:

$$U_1 = 23,5 + 24,3 \arctg(0,011H - 1,45). \quad (1)$$

Расчет произведен в интервале напряженности магнитного поля $0 \leq H \leq 1000$ А/см. Электрическое напряжение выражено в милливольтгах, а напряженность магнитного поля — в А/см.

Найдена функция электрического напряжения при намагничивании магнитного носителя в обратном направлении:

$$U_2 = -23,5 + 0,61U_1 + (24,5 + 0,4U_1) \arctg((0,011 + 0,000087U_1)H + 1,45 - 0,0016U_1). \quad (2)$$

Расчет произведен в интервале напряженности магнитного поля -1000 А/см $\leq H \leq 0$.

Функция электрического напряжения при намагничивании магнитного носителя в прямом направлении после воздействия импульсом обратного направления будет:

$$U_3 = 23,5 - 0,61U_2 + (24,5 + 0,4U_2) \arctg((0,011 + 0,000087U_2)H - 1,45 + 0,0016U_2). \quad (3)$$

Расчет произведен в интервале напряженности магнитного поля $0 \leq H \leq 1000$ А/см.

Графики указанных функций изображены на рис.1. Восходящие ветви гистерезиса 1, 2 и 3 получены по формуле (3) для начальных значений электрического напряжения соответственно $U_2 = 0$, $U_2 = -27$ мВ и $U_2 = -54$ мВ, а нисходящие ветви 4, 5 и 6 — по формуле (2) для значений напряжения $U_1 = 0$, $U_1 = 27$ мВ и $U_1 = 54$ мВ. Зависимости 1—6 соответствуют распределениям остаточных магнитных полей магнитного носителя.

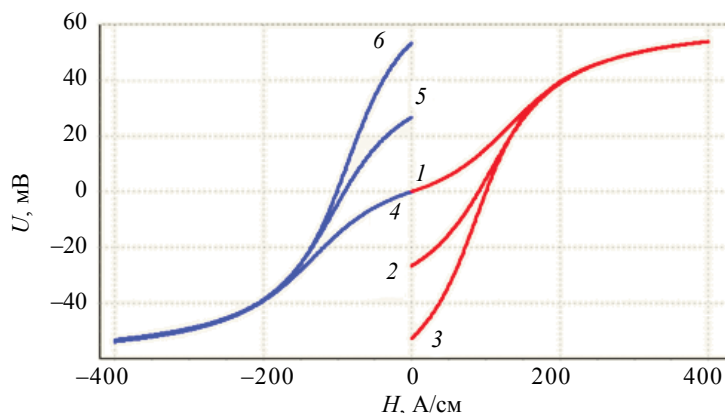


Рис.1. Расчетная зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, от напряженности воздействующего магнитного поля $U(H)$.

Максимальная крутизна начальной кривой 1 на рис.1, то есть максимальная чувствительность датчика магнитного поля на этой кривой, составляет $0,26 \text{ мВ} \cdot \text{А/см}$.

Воздействуем на размагниченный магнитный носитель с гистерезисными свойствами, представленными на рис.1, косинусоидальным импульсом в полволны положительной полярности. Тогда на МН будет осуществлена запись распределений магнитных полей источника, соответствующая моменту времени, при котором достигается максимальная величина напряженности магнитного поля. Воздействуем на этот магнитный носитель вторым таким же импульсом магнитного поля, но с противоположной полярностью и с меньшей амплитудой. В результате на МН будет осуществлена запись распределений магнитных полей источника, соответствующая моменту времени, при котором достигается максимальная величина напряженности магнитного поля второго импульса. При этом параметры полученных распределений магнитных полей зависят также от распределения остаточной намагниченности МН в результате воздействия первым импульсом.

Это происходит следующим образом. В результате воздействия на размагниченный МН первым импульсом источника однородного магнитного поля с амплитудой больше 400 А/см весь магнитный носитель будет однородно намагничен и величина электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего МН, согласно зависимости 1 на рис.1 будет больше, чем 54 мВ над всеми точками его поверхности.

Если же источник магнитного поля создает неоднородное локальное магнитное поле, то величина напряжения по точкам МН вдоль ординаты x будет распределяться согласно точкам зависимости 1 .

Воздействуем на намагниченный МН вторым импульсом магнитного поля с такой же абсолютной величиной амплитуды, но противоположного направления. В случае однородного магнитного поля весь магнитный носитель перемагнитится и будет намагничен до того же состояния, что и после воздействия первым импульсом, но с противоположной полярностью. Аналогичный результат будет получен для источника неоднородного магнитного поля: магнитный носитель будет намагничен также неоднородно, как и после первого импульса, но в противоположном направлении.

Указанным распределением остаточной намагниченности МН соответствуют расчетные зависимости величины электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, от напряженности воздействующего магнитного поля $U(H)$.

Если же амплитуда второго импульса противоположного направления будет меньше, чем амплитуда первого импульса и выводит сигнал, например, на уровень 54 мВ , то распределение сигнала по точкам поверхности магнитного носителя будет определяться зависимостью 6 . Тогда, в случае линейного источника импульсного магнитного поля на проекции его оси на плоскость МН, произойдет максимальное перемагничивание магнитного носителя в данном направлении, а по мере удаления от этой оси остаточная намагниченность будет все меньше изменяться. Таким образом, можно получить зависимость $U(x)$ с отрицательным максимумом на проекции оси и двумя положительными максимумами справа и слева от нее. В соответствии с разработанной программой, определяемой функциями (1), (2), (3), установкой амплитуд импульсов, последовательностью их применения и интервалами задания величины аргумента происходит переход от точек начальной функции (1) к точкам ветвей 6 , 5 , 4 и всех остальных не показанных на рис. 1 нисходящих ветвей.

В результате воздействия третьим импульсом магнитного поля работают восходящие ветви зависимости $U(H)$, например, ветви 1, 2 и 3. С уменьшением амплитуды импульсов поля используются ветви с меньшими начальными значениями U .

Для повышения точности измерений с использованием гистерезисной интерференции формирование фронтов импульсов сложной формы можно осуществлять с помощью двух и более источников импульсного магнитного поля действующих одновременно или с различными задержками во времени.

При расчете HI с использованием двух перекрывающихся во времени разнополярных импульсов магнитного поля, сдвинутых по фазе относительно друг друга, следует рассчитать величину первого максимума напряженности магнитного поля и величину последующего максимума противоположной полярности за время действия обоих импульсов. Величины этих максимумов сигнала при задержке второго импульса относительно первого на $\varphi_{01} = \pi/8$ и $\varphi_{02} = \pi/4$ можно найти соответственно из графиков на рис. 2а, б.

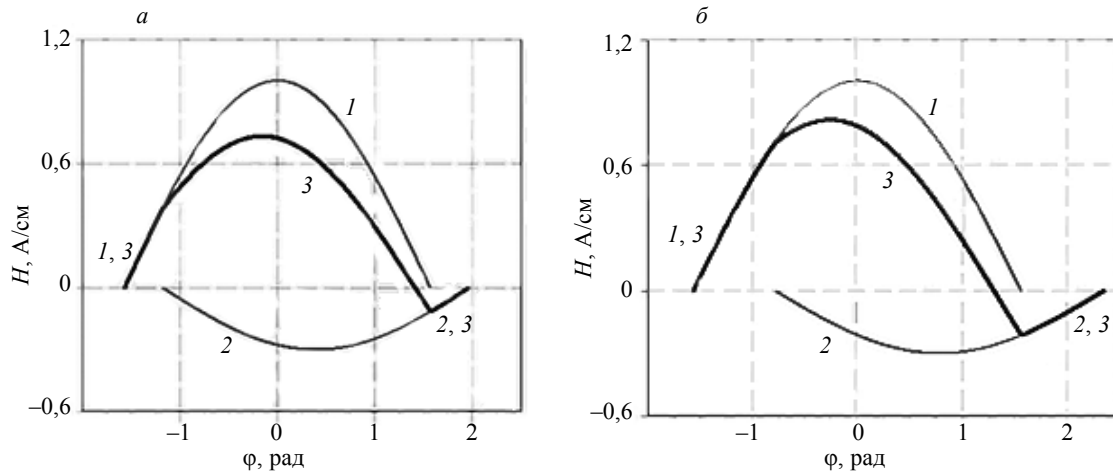


Рис. 2. Сложение напряженностей воздействующих импульсных магнитных полей, соответствующих амплитудам прямого импульса 1 А/см и обратного импульса $-0,3$ А/см, сдвинутых по фазе на углы φ_{01} и φ_{02} .

На этих рисунках первый импульс обозначен через 1, второй — 2, а выделенный суммарный импульс обозначен цифрой 3.

Для использования полученных результатов в последующих расчетах распределений магнитных полей импульсов с разными амплитудами в данном случае удобно принять амплитуду первого сигнала равной 1 А/см. Тогда амплитуда второго сигнала будет $-0,3$ А/см. Зависимости 3 на рис. 2 описываются функцией

$$H = \cos \varphi - 0,3 \cos(\varphi - \varphi_0), \quad (4)$$

где φ_0 равно соответственно φ_{01} и φ_{02} . Значения аргументов первых максимумов напряженности магнитного поля $H_{\max 1}$ и $H_{\max 2}$ находим приравниванием нулю производной функции (4):

$$\sin \varphi - 0,3 \sin(\varphi - \varphi_0) = 0 \quad (5)$$

с последующим разложением полученной функции

$$\sin \varphi - 0,3 \sin \varphi \cos \varphi_0 + 0,3 \cos \varphi \sin \varphi_0 = 0. \quad (6)$$

Отсюда для $\varphi_0 = \varphi_{01} = 0,3927$ получаем значение аргумента для положительного максимума

$$\varphi_1 = \arctg(-0,1588) = -0,1602. \quad (7)$$

Тогда величина положительного максимума будет равна $H_{\max 1} = 0,7317$ А/см. Этому максимуму соответствует отрицательный максимум, равный $H_{\max 11} = -0,1148$ А/см. Этот отрицательный максимум найден по формуле:

$$H_{\max 11} = -0,3 \cos(\pi/2 - \pi/8). \quad (8)$$

Аналогичным образом для $\varphi_{02} = \pi/4$ получаем:

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg}(-0,2692) = -0,2629;$$

$$H_{\max 2} = 0,8159 \text{ А/см и } H_{\max 22} = -0,2121 \text{ А/см.}$$

При задержке второго импульса $\varphi_{03} \geq \pi/2$ положительный максимум равен 1 А/см, а отрицательный максимум составляет $-0,3$ А/см. Такой же результат получается в случае воздействия на магнитный носитель отдельными, неперекрывающимися во времени импульсами.

Произведем расчеты магнитных полей для линейного индуктора, зависимость тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля которого на поверхности магнитного носителя от расстояния x до проекции оси индуктора на МН определяется как

$$H = A / (x^2 + 0,36), \quad (9)$$

где x измеряется в см, а H — в А/см. Линейный индуктор находится на расстоянии 0,6 см от МН параллельно плоскости носителя.

Для того, чтобы получить интерференционную картину в результате воздействия на магнитный носитель суммарным импульсом магнитного поля 3 (рис. 2а), надо в формулу (1) подставить выражение для H из формулы (9), в которой амплитуда поля равна $H_{\max 1}$, после чего найти распределение U_2 по формуле (2), в которой использована величина второго максимума $H_{\max 11}$. В случае трех импульсов используется формула (3) с заданной амплитудой третьего импульса и формула (9).

На рис. 3 показаны расчетные зависимости 1—4 электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель с записями остаточных магнитных полей от расстояния до проекции оси линейного индуктора на магнитный носитель $U(x)$. Зависимости 1, 2 и 3 соответствуют задержке второго сигнала соответственно на $\varphi_{01} = \pi/8$, $\varphi_{02} = \pi/4$ и $\varphi_{03} \geq \pi/2$. Зависимость 4 является зеркальной функцией зависимости 3.

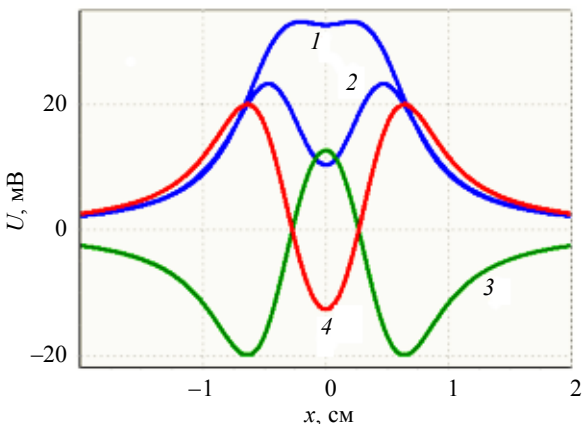


Рис. 3. Рассчитанная по формулам (1), (2) и (9) гистерезисная интерференционная картина $U(x)$.

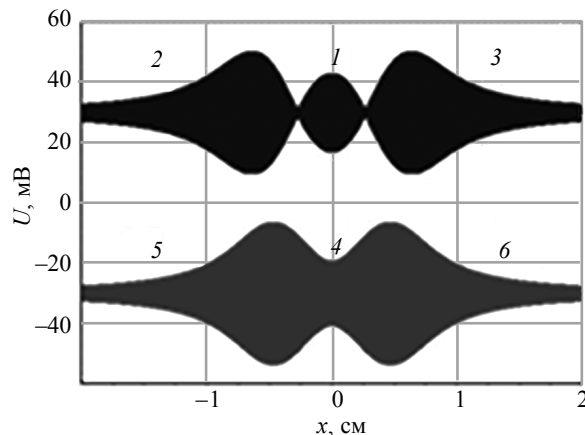


Рис. 4. Оптические изображения магнитных полей, интерференционная картина $U(x)$.

На основании графиков 1—3 зависимостей $U(x)$, изображенных на рис. 3, сформированы оптические изображения магнитных полей путем построения прямых и зеркальных функций и установления уровней оттенков цветности (уровней оттенка серого), полученных замкнутых геометрических фигур.

Так, на рис. 4 показано оптическое изображение магнитного поля, соответствующее графику 1 на рис. 3 с нулевыми максимумами 1 и 4 и первыми максимумами 2, 3, 5 и 6. Максимум 1 имеет второй порядок, потому что намагничивание соответствующего ему участка МН было в одном направлении, а потом — в противоположном. Максимум 4 является максимумом первого порядка, так как намагничивание его участка произошло только в одном направлении. При этом указанные перемагничивания могут быть как реальными, так и виртуальными, то есть полученными в резуль-

тате алгебраических действий. В обоих случаях они позволяют на порядок и выше повысить чувствительность и точность контроля.

На рис. 5 показана расчетная зависимость напряженности магнитного поля двух перекрывающихся во времени импульсов. Первый импульс 1 (амплитуда 1 А/см, сдвиг по фазе максимума сигнала на угол $\varphi_{01} = 2,0$ рад), второй импульс 2 (амплитуда 0,6 А/см, сдвиг по фазе на угол $\varphi_{02} = 0$ рад), суммарный импульс 3, третий импульс 4 (амплитуда 0,25 А/см, сдвиг по фазе на угол $\varphi_{04} = -0,18$ рад). Если время нарастания первого импульса $t_{\max 1} = 5 \cdot 10^{-5}$ с, то время нарастания второго (участок 3, рис. 5) и третьего импульсов (участок 4, рис. 5) равны соответственно $t_{\max 2} = 4,3 \cdot 10^{-6}$ с и $t_{\max 3} = 2,1 \cdot 10^{-6}$ с. Пусть амплитуда первого импульса 1 (см. рис. 5) равна 400 А·см, что соответствует величине постоянной $A = 144$ А·см. Тогда постоянные для второго 2 и третьего 4 импульсов будут равны соответственно $-86,4$ и 36 А·см, что соответствует отношению амплитуд импульсов, изображенных на рис. 5. Гистерезисная интерференционная картина магнитного поля на магнитном носителе, полученная с помощью трех импульсов, показанных на рис. 5, изображена на рис. 6.

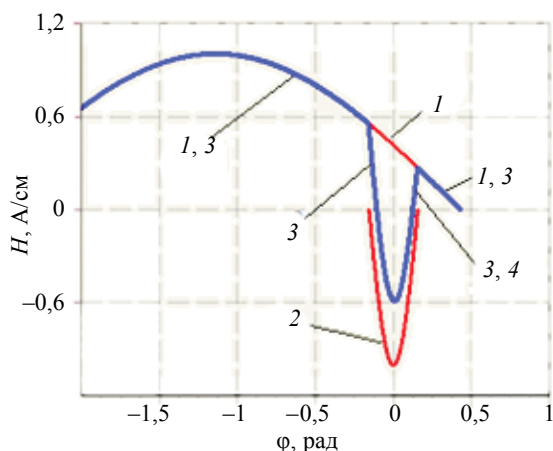


Рис. 5. Расчетная зависимость напряженности магнитного поля двух перекрывающихся импульсов амплитудами 1 и $-0,3$ А/см.

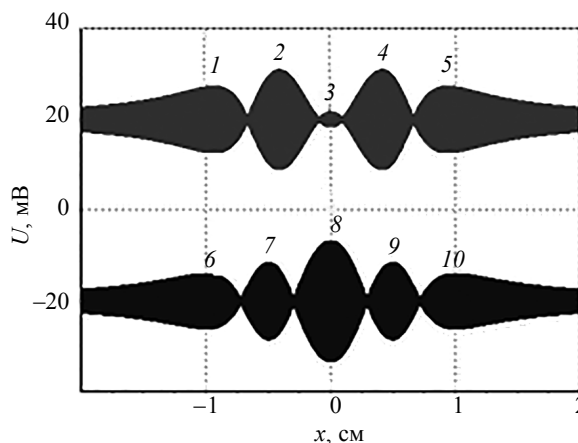


Рис. 6. Оптические изображения магнитных полей, интерференционная картина $U(x)$.

Здесь 1 и 5 — вторые максимумы первого порядка (намагничивание произошло один раз), 2 и 4 — первые максимумы второго порядка (намагничивались дважды) и 3 — нулевой максимум третьего порядка, соответствующий положению проекции оси линейного индуктора. Этот максимум получился при последовательном намагничивании соответствующего ему участка МН первым, вторым и третьим импульсами.

Проведем оценку результатов расчетов для алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм. Согласно экспериментальным данным [12] напряженность поля вблизи поверхности этой фольги для указанных импульсов возрастает соответственно в 1,015, 1,18 и 1,36 раза. Тогда коэффициенты A в формуле (9) будут равны соответственно 146,2, -102 , 49,0 А·см и для указанных импульсов получаем интерференционную картину с максимумами 6—10 на рис. 6. При этом изменились величины всех максимумов. Так, амплитуда нулевого максимума увеличилась с 3,5 до 27 мВ.

Преимущества использования гистерезисной интерференции подтверждаются следующим примером. Увеличим толщину алюминиевой фольги на 10 % с 0,01 до 0,011 мм. Воздействуем на слой фольги толщиной 0,011 мм тремя импульсами магнитного поля, показанного на рис. 5, и получим интерференционную картину, аналогичную картине с максимумами 6—10 на рис. 6. Однако величины максимумов гистерезисной интерференции для слоя фольги толщиной 0,011 мм будут другими. На основании результатов [12] можно определить, что напряженность поля вблизи поверхности фольги толщиной 0,011 мм для указанных импульсов возрастает соответственно в 1,0015, 1,018 и 1,036 раза по сравнению с напряженностью для фольги толщиной 0,01 мм. Тогда коэффициенты A в формуле (9) будут равны соответственно 146,4, $-103,8$, 50,8 А·см. Выделим изображения нулевых максимумов для этих двух слоев фольги, проведем с ними одинаковые алгебраические операции и получим изображения нулевых максимумов 1 и 2 на рис. 7. Нулевой максимум 1 гистерезисной интерференции для фольги толщиной 0,01 мм составляет 0 мВ, а нулевой максимум 2 для фольги толщиной 0,011 мм равен 4,2 мВ. При этом применен разработанный нами метод

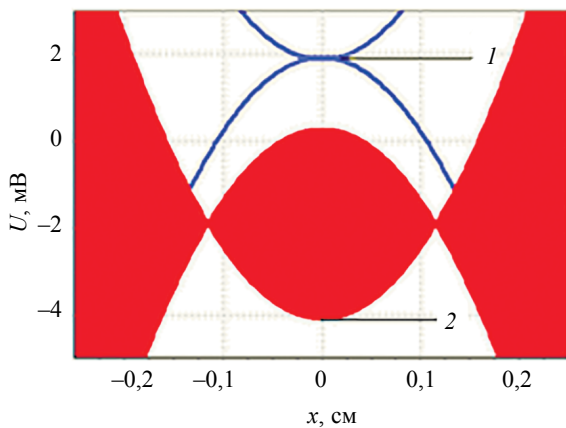


Рис. 7. Оптические изображения магнитных полей, интерференционная картина $U(x)$.

нулевого уровня, при использовании которого амплитуда нулевого, а в общем случае любого выбранного максимума, путем алгебраических операций достигает нулевого значения и в результате такой же последовательности действий определяется амплитуда других максимумов и минимумов электрического сигнала.

Таким образом, увеличению коэффициента A с 49,0 до 50,8 А·см, то есть увеличению амплитуды магнитного поля в 1,037 раза, соответствует увеличение сигнала с использованием HI с 0 до 4,2 мВ. При осуществлении эксперимента учитывается предельно допустимая погрешность на

данном диапазоне измерения. Если величина этой погрешности равна 0,1 мВ, то соотношение сигнал — шум составляет 42 раза, что позволяет повысить на порядок и выше как чувствительность измерений, так и точность контроля свойств металлических объектов.

Представленные выше расчеты гистерезисной интерференции линейного индуктора могут быть применены также для определения удельной электропроводности электропроводящих материалов и локальных полей дефектов сплошности и структурных неоднородностей в металлических объектах. С помощью линейного индуктора можно моделировать поля протяженных дефектов таких, как поверхностные и глубинные трещины, непровары, деформированные стыковые соединения и другие дефекты. Используя линейный индуктор и другие локальные источники магнитного поля и применяя разработанные методы гистерезисной интерференции на магнитном носителе или других пленочных детекторах магнитного поля, можно также определять удельную электропроводность материалов объектов совместно с их толщиной.

ВЫВОДЫ

Представлены расчеты гистерезисной интерференции (HI) импульсного магнитного поля на магнитном носителе для перекрывающихся с разными временными задержками импульсов магнитного поля. HI представлена в виде интерференции зависимостей электрического напряжения $U(x)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель с остаточными магнитными полями, от расстояния x до проекции оси индуктора на плоскость магнитного носителя. Распределения $U(x)$ получены на основании расчетов зависимостей электрического напряжения $U(H)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, от напряженности приложенного магнитного поля. Восходящие и нисходящие ветви гистерезисных зависимостей используемого магнитного носителя $U(H)$ представлены функциями арктангенса. На основании полученных распределений сформированы оптические изображения остаточных магнитных полей. Показано, что использование полученных результатов позволяет повысить чувствительность измерений и точность контроля толщины, удельной электропроводности металлических объектов, а также параметров дефектов сплошности в них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Минск: Вышэйшая школа, 1976. 256с.
2. Новиков В.А., Кушнер А.В., Шилов А.В. Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель. Схемы намагничивания // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 30—35.
3. Грузинцев А.А., Михайлов С.П. Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током // Дефектоскопия. 2011. № 2. С. 22—30.
4. Шур М.Л., Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Магнитное поле дефекта произвольной формы в плоскопараллельной пластине // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 14—27.
5. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56—62.

6. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Известия высших учебных заведений. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
7. Печенков А.Н., Щербинин В.Е. Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 48—55.
8. Astakhov V.I., Danilina E.M., Ershov Yu.K. On the Question of Inspecting the Plate with a Crack by the Eddy-Current Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 3. P. 182—191. [Астахов В.И., Данилина Э.М., Ершов Ю.К. К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.]
9. Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л. Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик—ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 3—12.
10. Skvortsov B.V., Samsonov A.S. et al. Theoretical basics for inspection of conducting coatings in aircraft fuel tanks // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 5. P. 378—386. [Скворцов Б.Г., Самсонов А.С., Борминский С.А., Живоносная Д.М. Теоретические основы контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 46—54.]
11. Новиков В.А., Шилов А.В. Экспериментальное определение глубины залегания и величины цилиндрического дефекта в ферромагнитной пластине с использованием визуализирующей магнитные поля пленки // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 25—30.
12. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
13. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 53—68.
14. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л. Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 11—20.
15. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. et al. Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 2. P. 121—127. [Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л. Расчеты распределений импульсных магнитных полей при гистерезисной интерференции // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 41—47.]
16. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Using Film Flux Detectors to Determine Properties of Conducting and Magnetic Objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 1. P. 70—76. [Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Применение пленочных флюкс-детекторов для определения свойств электропроводящих и магнитных объектов // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 52—57.]